

EXPLOSIÓN VERSUS VIBROSEIS

Análisis comparativo de tecnologías de exploración geofísica y alternativas de bajo impacto ambiental

A - INTRODUCCIÓN

Los movimientos ambientalistas se oponen firmemente a las campañas de sísmica 3D por explosión en tierra (*onshore*), denunciando el impacto directo de las detonaciones en la fauna y los ecosistemas, la destrucción de los suelos y la vegetación debido al paso de maquinaria pesada, así como los riesgos de contaminación de las napas subterráneas. Critican principalmente este método por considerarlo una herramienta que facilita en exceso la expansión de los combustibles fósiles.

El público en general desconoce los avances tecnológicos recientes en las técnicas de exploración sísmica e ignora la diversidad de métodos existentes. En el imaginario colectivo, la exploración se reduce casi siempre a la sísmica por explosivos y a la sísmica por Vibroseis.

Los principales argumentos ambientales y sociales planteados contra la sísmica tradicional se estructuran en varios ejes fundamentales:

1. Impacto de las ondas de choque y explosivos en la fauna y la flora

- **Perturbación de los ecosistemas:** Las cargas explosivas, colocadas en pequeñas perforaciones previas, generan ondas sísmicas de alta intensidad. Estas perturban gravemente a los animales terrestres y subterráneos, provocando estrés agudo, cambios de comportamiento duraderos e incluso el abandono total de zonas de reproducción o de invernada.
- **Destrucción de hábitats:** Para desplegar las líneas físicas de geófonos y las fuentes (ya sean explosivos o camiones vibradores), suele ser necesario desmontar y abrir picadas rectas en áreas naturales frágiles o bosques, lo que causa una severa fragmentación de hábitats y acelera la erosión del suelo.

2. Riesgos vinculados a las perforaciones para explosivos

- **Contaminación de acuíferos:** El método por explosión requiere perforar pozos de tiro que varían entre unos pocos metros y decenas de metros de profundidad. Los expertos advierten sobre el riesgo crítico de contaminación de las napas freáticas superficiales y profundas, ya sea por la mezcla accidental de agua de diferentes estratos o por la infiltración de residuos químicos de los explosivos.
- **Degradación geológica:** El uso repetido de dinamita puede generar microfisuras en la matriz rocosa subyacente, alterando el flujo de aguas subterráneas y debilitando de forma irreversible la estabilidad mecánica del suelo.

3. Molestias para los pobladores locales

- **Vibraciones y contaminación acústica:** Las explosiones sucesivas y el tránsito continuo de camiones pesados generan ondas acústicas y vibraciones de gran amplitud que incomodan a las comunidades locales y pueden causar microfisuras estructurales en los cimientos de las viviendas cercanas.

4. La crítica climática global

- **Continuidad de la era de los combustibles fósiles:** Más allá de los daños físicos visibles directamente en el terreno, el argumento central de las organizaciones no gubernamentales (ONG) es que la sísmica 3D es solo una fase preparatoria de una costosa exploración industrial. Su objetivo último sigue siendo el hallazgo de nuevos yacimientos de petróleo, gas convencional o gas de esquisto (shale). Para los movimientos ambientales, invertir masivamente en esta tecnología contradice directamente los objetivos internacionales de descarbonización y lucha contra el calentamiento global.

Nota clave: La diferencia fundamental entre los dos grandes métodos tradicionales radica en el control preciso de la energía: la sísmica por explosión libera un impulso acústico violento, destructivo e instantáneo, mientras que el camión vibrador (Vibroseis) inyecta en el suelo una onda de frecuencia continua, progresiva y modulada.

5. Comparación detallada de impactos (Control de la energía)

Crterios	Método por Explosivos	Método Vibroseis
a- Impactos ambientales	Alto riesgo de trauma en la fauna local (efecto sorpresa). Contaminación duradera del subsuelo por residuos químicos.	Contaminación acústica continua pero progresiva, lo que permite la huida de los animales. Contaminación limitada a posibles fugas de fluidos hidráulicos.
b- Impactos en estructuras	Fuertes vibraciones superficiales que pueden agrietar edificaciones cercanas. Uso estrictamente prohibido o regulado en áreas urbanas.	Frecuencias moduladas para evitar la resonancia en edificios. Despliegue seguro y frecuente en entornos urbanos o industriales.
c- Impactos geofísicos	Señal de alta frecuencia ideal para imágenes de gran profundidad. Alteración de la señal inicial en la zona plástica de impacto directo.	Señal perfectamente repetible y ajustable para apuntar a capas específicas. Menor penetración a profundidades extremas.
d- Impactos logísticos	Perforación previa obligatoria de pozos de tiro profundos. Logística compleja para el almacenamiento y transporte de materiales peligrosos.	Compactación superficial visible debido al peso de los camiones (20 a 30 toneladas). Limitado a terrenos transitables o rutas.

6. Profundidades de investigación según el objetivo

La elección del método de exploración o perforación depende directamente de la profundidad del objetivo geológico:

- **Muy baja profundidad (0 a 50 metros): Geotecnia**
 - *Aplicaciones:* Construcción de infraestructura, cimientos y estudio mecánico de suelos.
 - *Técnicas:* Ensayos de penetración (SPT/CPT), perforación con barrena, muestreo de núcleos convencional, Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT).
- **Baja a media profundidad (50 a 500 metros): Geotecnia pesada y Geotermia de baja entalpía**
 - *Aplicaciones:* Grandes obras civiles (túneles) y geotermia residencial (bombas de calor).
 - *Técnicas:* Perforación Rotary (circulación directa), perforación con martillo de fondo (MFT), sísmica de refracción.
- **Gran profundidad (500 a 3,000 metros): Geotermia profunda (Hidrotermal)**
 - *Aplicaciones:* Captación de acuíferos calientes para calefacción urbana o generación eléctrica.
 - *Técnicas:* Perforación Rotary pesada (dirigida), sísmica de reflexión 2D/3D, perfilajes eléctricos (diagramas de pozos).
- **Profundidad extrema (Más de 3,000 a 7,000 metros): Petróleo, Gas y Geotermia Estimulada (EGS)**
 - *Aplicaciones:* Campos de alta presión y temperatura extrema.
 - *Técnicas:* **Tecnología satelital RSS-NMR** (recuperación de datos desde el espacio mediante satélites dedicados), sísmica de reflexión 3D/4D.

B - VIBROSEIS VERSUS EXPLOSIÓN

El impacto ambiental, logístico y técnico del método Vibroseis (camiones vibradores) y de la sísmica por explosión (dinamita) varía radicalmente según la topografía del terreno. En términos generales, el Vibroseis se prefiere en entornos urbanos y desérticos por su seguridad operativa y rapidez de ejecución. Por el contrario, la sísmica por explosión sigue siendo técnicamente indispensable en bosques densos debido a las restricciones de accesibilidad geográfica.

1. Análisis detallado por entorno de intervención

1. Impacto en entornos boscosos / selváticos

- **Vibroseis (Camiones vibradores):** Destrucción de la flora debido a la necesidad de abrir picadas de 3 a 5 metros de ancho, causando una deforestación local significativa; fragmentación de hábitats que perturba a la fauna y corta corredores ecológicos; compactación irreversible del suelo forestal por el peso extremo de los vehículos.
- **Sísmica por explosión:** Preservación del dosel forestal (canopea) gracias al uso de equipos livianos (heliportados o cargados a pie) que solo requieren senderos estrechos de menos de 1.5 metros;

alteración pasajera, ya que las detonaciones asustan puntualmente a la fauna pero no destruyen su hábitat a largo plazo.

2. Impacto en entornos desérticos

- **Vibroseis (Camiones vibradores):** Logística ideal en grandes planicies que permite un avance a velocidad récord; cero residuos químicos y sin consumo de agua; huellas superficiales que el viento borra rápidamente en la arena.
- **Sísmica por explosión:** Dificultad para perforar en dunas inestables que exigen entubados sistemáticos; alto consumo de agua, un recurso crítico en zonas áridas.

3. Impacto en entornos urbanos y semiurbanos

- **Vibroseis (Camiones vibradores):** Protección de las estructuras mediante vibraciones programadas electrónicamente (*curvas de sweep*) que respetan las normas; nivel de ruido moderado.
- **Sísmica por explosión:** Peligro crítico de agrietamiento en edificios y rotura de redes de servicios esenciales (gas, agua); prohibición legal estricta en la cercanía de zonas habitadas en casi todo el mundo.

Conclusión de la evaluación: El Vibroseis prevalece allí donde los vehículos pueden transitar sin destruir el entorno (ciudades, desiertos, llanuras). En cambio, la sísmica por explosión sigue siendo la única alternativa viable en geografías complejas (selvas densas, montañas). No obstante, ninguna de estas técnicas convencionales puede emplearse dentro de un parque nacional debido a sus daños colaterales.

C - NUEVAS TECNOLOGÍAS DE EXPLORACIÓN: RSS-NMR Y SÍSMICA DE BAJO IMPACTO

El uso de la tecnología **RSS-NMR** (*Remote Sensing Survey - Nuclear Magnetic Resonance*) constituye una de las soluciones más innovadoras para estudiar el subsuelo de un área ecológicamente protegida. A diferencia de la sísmica 3D convencional, la RSS-NMR es un método estrictamente pasivo y no intrusivo.

1. Problemáticas de la sísmica clásica en zonas sensibles

- **Destrucción de la flora:** Obligación de abrir líneas rectas (picadas o layons) cortando la vegetación para desplegar los equipos.
- **Perturbación de la fauna:** Las explosiones o vibraciones ahuyentan o causan un estrés severo a los animales silvestres.
- **Trabas administrativas:** La obtención de permisos ambientales en áreas protegidas suele demorar años o resultar inviable.

2. Principios fundamentales de la alternativa pasiva RSS-NMR

1. **Teledetección (RSS):** Sensores satelitales realizan análisis espectrales avanzados a distancia para identificar anomalías geológicas sin contacto físico con el suelo.
2. **Resonancia Magnética Nuclear (RMN/NMR):** Aprovecha las variaciones del campo magnético terrestre combinadas con microondas para hacer reaccionar los protones de los fluidos (agua, hidrocarburos). Cada fluido emite una "huella" molecular única.

3. Aplicaciones concretas para la preservación de parques naturales

- **Hidrogeología y gestión del agua:** Mapear acuíferos y evaluar la porosidad del suelo sin alterar los ecosistemas.
- **Estudios estructurales y de riesgos:** Detectar fallas geológicas para prevenir deslizamientos de tierra.
- **Transición energética:** Evaluar el potencial geotérmico de una zona de manera completamente limpia.

D - ANÁLISIS COMPARATIVO TRIPARTITO DE LAS TECNOLOGÍAS DE EXPLORACIÓN

1. Evaluación detallada de los impactos por tecnología

Sísmica por Explosión (Dinamita)

Impacto ambiental y acústico **alto**. Requiere perforación de pozos de tiro, desmonte severo de picadas, ruidos masivos y ondas de choque violentas que ponen en riesgo la estabilidad del suelo y la fauna. Logística pesada por el manejo de explosivos peligrosos.

Sísmica por Camiones Vibradores (Vibroiseis)

Impacto ambiental y acústico **moderado**. Sin explosivos, pero causa una importante compactación mecánica del suelo (camiones > 30 toneladas) y ruido continuo de motores térmicos. Las vibraciones se inyectan de forma progresiva (normas APAVE), limitando el daño estructural.

Exploración por RSS-NMR (Teledetección y RMN)

Impacto ambiental, vibratorio y acústico **estrictamente nulo**. La adquisición se realiza desde el espacio mediante el campo magnético terrestre. Sin vehículos pesados, sin perforaciones, sin molestias. Impacto regulatorio mínimo que elimina la necesidad de tramitar permisos complejos antes de conocer el potencial real de un bloque.

2. Proceso de toma de decisiones estratégicas y marcado de "Sweet Points"

La tecnología RSS-NMR mapea y marca con precisión los «**Sweet points**» (las zonas óptimas de acumulación de fluidos) en el bloque explorado. En esta etapa, los operadores del bloque deciden si avanzan a la siguiente fase de exploración mediante pozos exploratorios.

Aunque el método RSS-NMR entrega las coordenadas completas (longitud, latitud, profundidad, presión) para ubicar directamente un pozo, es habitual que se prefiera validar los datos mediante un método sísmico local enfocado exclusivamente en estos Sweet points.

Recomendación: Sugerimos emplear las técnicas modernas de **sísmica de nodos portados** (especialmente la tecnología desarrollada por la empresa **Stryde**). Aunque su costo unitario es mayor, se aplican sobre áreas muy reducidas y específicas, brindando un resultado de alta definición.

E - SÍSMICA DE BAJO IMPACTO O SÍSMICA DE NODOS PORTADOS

La sísmica de bajo impacto (*Low Impact Seismic - LIS*) y la sísmica de nodos portados constituyen una revolución tecnológica diseñada para obtener imágenes del subsuelo con ultra-alta resolución, reduciendo drásticamente la huella ambiental en la superficie.

1. Los pilares de la sísmica de bajo impacto (Low Impact Seismic)

- **Líneas de exploración reducidas y sinuosas:** Ancho reducido a menos de 2 metros. Los equipos esquivan manualmente los árboles grandes (*doglegs*), preservando el dosel forestal y bloqueando la línea de visión directa para proteger a la fauna frente a cazadores o depredadores.
- **Fuentes de energía miniaturizadas:** Uso de fuentes mucho más livianas (caídas de peso portátiles, mini-cargas enterradas) en reemplazo de los gigantescos camiones vibradores.
- **Sísmica pasiva:** Aprovechamiento del ruido ambiental natural de la Tierra (ondas oceánicas, viento) como fuente de onda continua, eliminando la necesidad de generar vibraciones artificiales.

2. Funcionamiento de los sistemas nodales sin cable (Nodos Portados)

La sísmica de nodos reemplaza los miles de kilómetros de cables de cobre por dispositivos autónomos, miniaturizados y completamente inalámbricos:

- **El concepto de «Nodo»:** Una pequeña caja hermética todo en uno que integra un geófono, una batería de alta capacidad, un chip GPS para la sincronización y una memoria Flash.
- **El aspecto «Portado» (Despliegue manual):** Cuadrillas livianas a pie transportan los nodos en mochilas (sistema Stryde) y los entierran levemente en el suelo sin excavaciones mayores.
- **Registro continuo:** Los nodos graban las vibraciones constantemente durante varias semanas antes de ser recolectados y conectados a un centro de datos móvil (*Nest*) para la descarga de la información.

F - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS

El método óptimo para explorar las reservas potenciales de hidrocarburos en un espacio altamente protegido como el **Parque Nacional del Chaco paraguayo** es el enfoque de **BAJO IMPACTO combinado con RMN**

(RSS-NMR). Ofrece el balance perfecto entre imágenes profundas y un impacto ambiental mínimo en el terreno.

1. Ventajas de la alianza tecnológica RSS-NMR + STRYDE

Rentabilidad y eficiencia operativa máximas

- **Monitoreo (Screening) del bloque por RSS-NMR:** Permite evaluar rápidamente una superficie enorme desde el espacio de forma confidencial (*mode Spy*), disminuyendo los costos de la fase de campo.
- **Reducción drástica de costos de terreno:** Los nodos miniatura STRYDE reducen hasta un 50% los costos operativos en comparación con la sísmica terrestre tradicional.
- **Complementariedad y velocidad:** El RSS-NMR aporta el macro-mapeo, mientras que Stryde provee la alta resolución geológica. El ciclo global de exploración se acelera entre un 30% y un 50%.

Impacto ambiental casi nulo (Low Impact)

- **Cero deforestación:** Transporte manual a pie por parte de los operadores, eliminando la necesidad de talar árboles (*no line clearing*).
- **Preservación de suelos y reducción de CO₂:** Sin riesgos de compactación del terreno debido a la ausencia de camiones pesados. Reducción masiva de la huella de carbono del proyecto.

Precisión y resolución de imagen inigualables

- **Detección directa vs. indirecta:** El acoplamiento con RMN permite detectar directamente la firma de los átomos de hidrógeno de los fluidos (porosidad, permeabilidad, agua vs. hidrocarburos).
- **Ultra-alta densidad de datos:** El despliegue de decenas de miles de sensores proporciona una claridad de imagen en **3D/4D** sin precedentes.

2. Hoja de ruta y decisiones para el ecosistema del Chaco paraguayo

- **Vibroseis: Descartado.** Vehículos demasiado pesados y apertura obligatoria de picadas que fragmentan el ecosistema forestal.
- **Explosión: Prohibido terminantemente.** Daños irreversibles a los suelos, amenazas a los acuíferos y estrés acústico extremo en especies protegidas (*yaguareté, pecarí*). Asimismo, la legislación paraguaya lo restringe en estas áreas.
- **RSS-NMR de superficie: Complementario.** Excelente método ecológico para evaluar porosidad superficial, pero su alcance vertical por sí solo es insuficiente para la exploración petrolera profunda, sirviendo principalmente como herramienta de calibración.

RECOMMANDACIÓN OPERACIONAL FINAL

1. **Descartar definitiva y totalmente** el uso de explosiones por dinamita.
2. **Utilizar la tecnología espacial RSS-NMR en la Fase 1** como la herramienta principal de tamizaje global (screening) para definir con precisión los *Sweet points*.
3. **Desplegar la sísmica inalámbrica por Nodos (tipo STRYDE) en la Fase 2** únicamente sobre las áreas de Sweet points, con movilización exclusiva a pie de las cuadrillas.
4. **Integrar el perfilaje NMR** directamente en las fases de perforación posteriores para analizar la saturación de los reservorios profundos, asegurando cero impacto en el ecosistema superficial.

Conclusión General: En el contexto de alta sensibilidad del Chaco paraguayo, la combinación secuencial de **RSS-NMR** (para la detección no invasiva) y **SÍSMICA DE BAJO IMPACTO POR NODOS** se consolida como la única estrategia viable, eficiente y sustentable para mapear las reservas profundas.